

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA – CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

INVESTIGAÇÃO DE MÉTODOS NÃO-CONVENCIONAIS DE
LUBRIRREFRIGERAÇÃO NO TORNEAMENTO DO AÇO INOXIDÁVEL
SUPER DUPLEX ASTM A182 F55

por

Lourenço Rad Miranda

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Mecânica da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Engenheiro Mecânico.

Porto Alegre, abril de 2023

Miranda, Lourenço Rad
INVESTIGAÇÃO DE MÉTODOS NÃO-CONVENCIONAIS DE
LUBRIRREFRIGERAÇÃO NO TORNEAMENTO DO AÇO INOXIDÁVEL
SUPER DUPLEX ASTM A182 F55 / Lourenço Rad Miranda. --
2023.
15 f.
Orientador: André João de Souza.

Trabalho de conclusão de curso (Graduação) --
Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de
Engenharia, Curso de Engenharia Mecânica, Porto
Alegre, BR-RS, 2023.

1. super duplex. 2. MQL. 3. vida da ferramenta. 4.
rugosidade média. I. de Souza, André João, orient.
II. Título.

Lourenço Rad Miranda

INVESTIGAÇÃO DE MÉTODOS NÃO-CONVENCIONAIS DE
LUBRIRREFRIGERAÇÃO NO TORNEAMENTO DO AÇO INOXIDÁVEL
SUPER DUPLEX ASTM A182 F55

ESTA MONOGRAFIA FOI JULGADA ADEQUADA COMO PARTE DOS
REQUISITOS PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
ENGENHEIRO MECÂNICO
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELA BANCA EXAMINADORA DO
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Prof. Cirilo Seppi Bresolin
Coordenador do Curso de Engenharia Mecânica

Área de Concentração: Processos de Fabricação

Orientador: Prof. Dr. André João de Souza

Comissão de Avaliação:

Prof. Dr. André João de Souza (Presidente)

Prof. Dr. Arnaldo Ruben Gonzalez

Prof. Dr. Patric Daniel Neis

Porto Alegre, abril de 2023

Aos meus pais, Julio e Luiza.

AGRADECIMENTOS

À UFRGS e aos professores que tive durante a minha formação acadêmica.

Ao professor André João de Souza, pela dedicação e mentoria ao longo deste e outros trabalhos.

Ao Laboratório de Automação em Usinagem (LAUS), em especial ao técnico Guilherme Vargas Schirmer e ao bolsista de iniciação científica Gabriel Melo Correa Pinto, pelo comprometimento e companheirismo.

À Micromazza – Indústria de Válvulas Ltda., pelos insumos utilizados neste trabalho: fluido de corte para MQL, material para usinagem e ferramentas de corte.

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio Grande do Sul (FAPERGS), pela bolsa de iniciação científica concedida durante parte de minha graduação, no LAUS, que despertou meu interesse pela pesquisa científica.

Aos meus amigos e familiares que direta ou indiretamente fizeram parte desta jornada.

À minha namorada, presente em todos os momentos da minha graduação.

Aos meus pais, por serem a pedra fundamental da minha formação.

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA – CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO – 2022

INVESTIGAÇÃO DE MÉTODOS NÃO-CONVENCIONAIS DE
LUBRIRREFRIGERAÇÃO NO TORNEAMENTO DO AÇO INOXIDÁVEL
SUPER DUPLEX ASTM A182 F55

Miranda, Lourenço Rad
lou-miranda@hotmail.com

Resumo. *Excelentes propriedades mecânicas, combinadas com alta resistência à temperatura e à corrosão, tornam o aço inoxidável super duplex apropriado para aplicações na indústria de petróleo e gás, em componentes e equipamentos inseridos em meios corrosivos, e demais condições críticas de operação. Entretanto, as propriedades que, por um lado tornam o emprego do material atrativo, por outro lado, dificultam a usinagem dos componentes, exigindo estudos mais aprofundados. Devido à crescente tendência da usinagem ambientalmente amigável, técnicas alternativas de lubrirrefrigeração vêm sendo empregadas. Assim, o trabalho visa investigar o efeito da aplicação da mínima quantidade de lubrificante (MQL) e do corte a seco, em comparação ao fluido de corte em abundância, na vida da ferramenta de metal-duro com revestimento PVD durante o torneamento de semiacabamento do super duplex ASTM A182 F55. Para tanto, utilizou-se dois níveis de velocidade de corte (120 e 80 m/min) e mantiveram-se constantes o avanço (0,1 mm/rev.) e a profundidade de corte (1,0 mm). Avaliou-se também o comportamento da rugosidade média (Ra) da superfície usinada durante os ensaios de vida. Os melhores resultados foram encontrados utilizando a técnica MQL em relação ao tempo de vida da ferramenta de corte e ao acabamento superficial da peça, tornando-a uma alternativa vantajosa.*

Palavras-chave: *super duplex, MQL, vida da ferramenta, rugosidade média.*

Investigation of non-conventional lubricooling methods in super duplex ASTM A182 F55 stainless steel turning

Abstract. *Excellent mechanical properties combined with high temperature and corrosion resistance make the super duplex stainless steel appropriate for applications in the oil & gas industry, components and equipment implanted in corrosive environments, and other critical operating conditions. However, the properties that, on the one hand, make the use of this material attractive, on the other hand, make the machining of its components difficult, requiring further studies. Due to the growing trend towards environmentally friendly machining, alternative lubrication-cooling techniques have been employed. Thus, this work aims to investigate the effect of applying minimal quantity lubrication (MQL) and dry cutting, compared to the abundant cutting fluid, on the PVD-coated carbide tool life during the semi-finishing turning of super duplex ASTM A182 F55. For this, two levels of cutting speed were used (120 and 80 m/min), while the feed rate (0.1 mm/rev.) and depth of cut (1.0 mm) were kept constant. The behavior of the average roughness (Ra) of the machined surface was also evaluated during the tool life tests. The best results were found using the MQL technique regarding the tool life and the workpiece surface finish, making it an advantageous alternative.*

Keywords: *super duplex, MQL, tool life, average roughness.*

1. INTRODUÇÃO

Os aços inoxidáveis duplex e super duplex podem ser caracterizados pela presença dos elementos químicos cromo, níquel, molibdênio e nitrogênio, e pela microestrutura de duas fases, aproximadamente 50% ferrita e 50% austenita, em volume. Isso confere a esses materiais excelente resistência mecânica, boa resistência à corrosão e à temperatura, além de alta ductilidade (Gamarrá e Diniz, 2018; Oliveira Jr. *et al.*, 2014). Essas propriedades permitem a esses aços desempenhar bom papel em componentes e equipamentos inseridos em meios corrosivos, submetidos a altas temperaturas, pressões, contato com produtos químicos agressivos e demais condições críticas de operação (Gamarrá e Diniz, 2018). Tais situações são observadas no setor petroquímico, de engenharia naval e no setor de exploração de petróleo e gás (Parsi *et al.*, 2020). Um exemplo de aplicação do aço inoxidável super duplex é na fabricação de componentes internos e externos de válvulas inseridas em fluidos com efeitos corrosivos críticos (Teles *et al.*, 2022).

Entretanto, as propriedades que, por um lado tornam o emprego do material atrativo, por outro lado dificultam a usinagem dos componentes (Gamarrá e Diniz, 2018; Paro *et al.*, 2001; Parsi *et al.*, 2020). A presença de austenita e elementos de liga, especialmente nitrogênio em altas porcentagens, diminui a usinabilidade do material que apresenta, além de baixa condutividade térmica, alta ductilidade e tendência ao encruamento (Ahmed *et al.*, 2017; Gamarrá e Diniz, 2018; Oliveira Jr. *et al.*, 2014; Paro *et al.*, 2001; Parsi *et al.*, 2020). Materiais com tendência a encruamento requerem mais energia para formação do cavaco, promovendo rebarbas muito duras, prejudiciais à vida de ferramentas de corte, pois causam remoção do revestimento e, conseqüentemente, aumentam a tendência de formação de desgaste de entalhe. Quanto à alta ductilidade, ela aumenta a região de contato entre cavaco e ferramenta, gerando desgastes por *attrition* (aderência e arrastamento) e abrasão mecânica, principalmente em altas velocidades de corte, e formação de aresta postiça de corte em baixas velocidades de corte (Diniz *et al.*, 2013). Conseqüentemente, as ferramentas de corte empregadas na usinagem dos aços inoxidáveis super duplex possuem tempo de vida reduzido. Embora a parcela de custos com ferramentas de corte (se comparada a outros custos do processo), não seja tão expressiva, uma vida prematura acarreta mais paradas para troca e, por conseqüência, perda de produtividade (Machado *et al.*, 2015).

Um dos principais critérios utilizados para a determinação da vida da ferramenta de corte em ensaios de torneamento é a condição da aresta de corte, mais especificamente o desgaste de flanco (VB). Este é um desgaste abrasivo utilizado com frequência como critério de fim de vida principalmente pela facilidade de avaliação quantitativa e é causado pelo atrito gerado pelo contato entre a superfície de folga da ferramenta e peça (Astakhov e Davim, 2008; Diniz *et al.*, 2013). A velocidade de corte é o parâmetro que exerce maior influência no desgaste da ferramenta, pois quanto maior seu valor, mais alta a temperatura na zona de corte, o que acelera os mecanismos de desgaste (Machado *et al.*, 2015).

Como forma de lubrificar a interface ferramenta-peça, reduzir a temperatura na zona de corte e auxiliar na remoção do cavaco, são utilizados fluidos de corte. Em materiais de difícil usinagem, o emprego de fluidos de corte é fundamental para melhorar o desempenho do processo (Mia *et al.*, 2018). Por esses motivos a aplicação de óleos puros, fluidos emulsionáveis ou sintéticos, em altas vazões (WET), é uma estratégia amplamente usada na indústria. Entretanto, este sistema é pouco eficiente, por gerar demasiado desperdício e pela dificuldade de penetração à zona de corte devido à obstrução do cavaco (Dixit *et al.*, 2012). Além desses fatores, a grande quantidade de fluidos de corte em operações de usinagem aumenta os custos de corte em processos de fabricação bem como uma grande quantidade de fluido usado exerce um impacto adverso no meio ambiente e na saúde dos operadores (Alves e Oliveira, 2007). Em

tais circunstâncias, esforços consideráveis têm sido feitos para eliminar ou minimizar o consumo do fluido de corte, mantendo seus benefícios na melhoria da usinabilidade.

Do ponto de vista econômico, ambiental e de saúde ocupacional, a usinagem a seco (DRY) é a melhor solução, pois não gera problemas de descarte, não polui e não representa risco à saúde do operador. Entretanto, esta alternativa também não garante as desejadas propriedades de lubrificação e refrigeração dos fluidos de corte, exigindo ferramentas com alta dureza a quente e revestimentos com baixo coeficiente de atrito (Dixit *et al.*, 2012). Alternativamente, uma técnica bastante utilizada para minimizar o uso de fluido de corte é a aplicação de mínima quantidade de lubrificante (MQL), que envolve uma baixa vazão de óleo, pulverizado na zona de corte (nebulização) com auxílio de ar comprimido sob pressão na zona de contato cavaco-ferramenta-peça (Dixit *et al.*, 2012; Masoudi *et al.*, 2018). Assim, o MQL reduz os pontos negativos relacionados ao WET, promovendo lubrificação ao processo que não se consegue com o DRY (diminui o atrito, a temperatura, e conseqüentemente, o desgaste da ferramenta e a rugosidade da superfície usinada) (Kang *et al.*, 2008).

A rugosidade é definida por irregularidades microgeométricas (micro-ondulações, marcas de avanço e falhas da ferramenta) que compõem a topografia (picos e vales) da superfície. Ela é frequentemente utilizada como parâmetro de saída do processo de usinagem, pois resulta da ação de corte (Machado *et al.*, 2015). Tais irregularidades podem ser avaliadas através de perfis e parâmetros de rugosidade. A rugosidade média “Ra” (ou desvio aritmético médio) é o parâmetro de avaliação de acabamento mais utilizado para o controle da usinagem, pois além de ser estável, indica alterações no processo, como desgaste da ferramenta. Entretanto, algumas características importantes do processo não são identificadas somente pelo uso de Ra (Machado *et al.*, 2015; Petropoulos *et al.*, 2010). Sendo assim, outros parâmetros são utilizados em conjunto, além do perfil de rugosidade que analisa graficamente as irregularidades.

Com a procura por novas soluções e pela melhoria do processo no setor de fabricação de componentes destinados a condições críticas (Gamarra e Diniz, 2018) somada ao aumento da demanda por estes materiais devido ao crescimento da indústria de exploração de petróleo e gás (Gamarra e Diniz, 2018; Oliveira Jr. *et al.*, 2014; Parsi *et al.*, 2020), estudos relacionados à usinagem destes materiais de difícil corte, especialmente com técnicas alternativas de lubrificação, tornam-se relevantes. Os estudos de Oliveira Jr. *et al.* (2014) sobre o torneamento do super duplex mostraram que a utilização de fluido de corte a alta pressão resultou em maior tempo de vida da ferramenta, boa rugosidade na superfície usinada e alta resistência a corrosão após o processo. Subhash *et al.* (2019) observaram melhorias tanto na rugosidade quanto no comportamento do desgaste para o método WET sobre o DRY. Rajaguru e Arunachalam (2020) conduziram estudos a respeito da influência do meio lubrificante na usinagem do aço inoxidável super duplex e observaram vantagens na utilização de MQL e WET sobre DRY, principalmente para o desempenho do desgaste da ferramenta. Maruda *et al.* (2015) também mostraram que a utilização de MQL gerou efeitos positivos nos parâmetros de rugosidade durante a usinagem do aço inoxidável duplex. Por fim, Parsi *et al.* (2020), compararam ferramentas de corte com e sem revestimento no torneamento do aço inoxidável super duplex e observaram que os insertos com cobertura têm uma vida útil quase duas vezes maior que os insertos sem cobertura.

Assim, este trabalho tem por objetivo avaliar o efeito da variação da velocidade de corte e das condições de lubrificação MQL e DRY em comparação ao WET na vida da ferramenta de corte de metal-duro com revestimento PVD-TiAlSiN durante o torneamento de semiacabamento do aço inoxidável super duplex ASTM A182 F55.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Os ensaios de vida envolveram o processo de torneamento longitudinal externo de semiacabamento em um corpo de prova cilíndrico de aço inoxidável super duplex ASTM A182 F55, com 68 mm de diâmetro e 243 mm de comprimento útil (Fig. 1a), cuja composição química é apresentada na Tabela 1. A usinagem foi realizada no torno CNC Mazak modelo Quick Turn Nexus 100-II, disponível no Laboratório de Automação em Usinagem (LAUS-UFRGS), utilizando insertos triangulares de metal-duro Sumitomo modelo TNMG 160408 N-GU, com revestimento PVD-TiAlSiN e raio de ponta $r_\epsilon = 0,8$ mm, fixado ao suporte Sandvik modelo DTJNL 2020 K16, que possui ângulo de posição $\chi_r = 93^\circ$ e ângulos de saída (γ_o) e inclinação (λ_s) negativos (-6°). De acordo com o fabricante, esse inserto é recomendado para corte de aço inoxidável (primeira opção) e superligas resistentes ao calor (segunda opção), garantindo maior estabilidade da vida da ferramenta, mesmo em condições instáveis. As faixas de velocidade de corte (v_c) e avanço (f) recomendadas são 80 a 140 [m/min] e 0,15 a 0,50 [mm/volta], respectivamente (Sumitomo, 2023). Ao todo foram empregados dois insertos, sendo que para cada condição de usinagem foi utilizada uma aresta de corte nova.

Tabela 1 – Composição química do aço inoxidável super duplex ASTM A182 F55 (% peso) (Bisaglia *et al.*, 2013).

C	Mn	N	S	P	Cr	Mo	Ni	Si
0,03	1,0	0,24 - 0,32	0,01	0,03	24,0 - 26,0	3,0 - 4,0	6,0 - 8,0	1,0

Três meios lubrificador-refrigerantes foram testados, para posterior análise comparativa entre seus efeitos: corte a seco (DRY), com fluido em abundância (WET) e utilizando mínima quantidade de lubrificação (MQL). Para a condição WET, foi empregado o fluido de corte sintético, isento de óleo, Synergy 905 da Blaser Swissslube, diluído em água, com vazão constante de 720 L/h. Para a condição de MQL, foi empregado o fluido Way45-V, da Bondmann Química, composto por nanopartículas esféricas de prata metálica, que, de acordo com fabricante, adentram nos picos e vales microscópicos, reduzindo o atrito por nano lubrificação (Bondmann, 2023). O fluido foi utilizado sem diluição em água e com vazão constante de 200 ml/h, pulverizado através de ar comprimido à pressão constante de 400 kPa.

O procedimento experimental consistiu no ensaio de vida das ferramentas de corte a partir das três condições de lubrificação previamente descritas. Foram realizados dois ensaios de vida para cada condição, considerando $v_{c1} = 120$ m/min e $v_{c2} = 80$ m/min, com avanço $f = 0,1$ mm/volta e profundidade de corte $a_p = 1,0$ mm mantidos constantes em todas as condições. Dessa forma, foram realizados seis ensaios de vida, sendo que a cada passe foram mensurados a rugosidade e o desgaste da ferramenta. A sequência dos passes foi planejada para remoção de material em três seções com iguais comprimentos de usinagem ($L = 81$ mm), para garantir menores tempos de corte para cada passe e permitir maior frequência de avaliação das condições de saída entre os passes. Para minimizar vibrações, causadas por desbalanceamento, buscou-se o corte de forma a escalonar o corpo de prova, conforme Figura 1b.

Devido à quantidade limitada de material, e como os ensaios de vida consistiram em operações de semiacabamento, o primeiro critério estabelecido para determinar o fim de vida da ferramenta foi limitar a largura da marca de desgaste de flanco (VB) em 200 μ m. Um segundo critério foi baseado no tempo máximo de corte " T_{max} " e no número máximo de passes, garantindo material suficiente para todas as seis condições. Assim, estabeleceu-se o tempo máximo de corte por condição de 14 min, e isso se traduz no número máximo de passes, apresentado na Tabela 2.

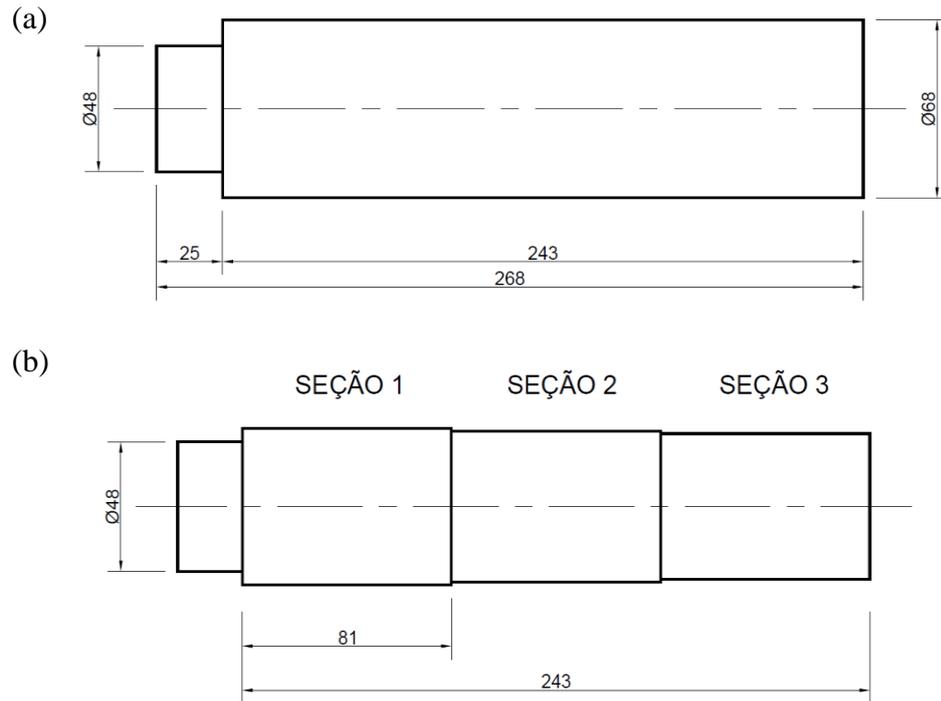


Figura 1 – Representação do corpo de prova: (a) antes dos ensaios; (b) após 18 passes.

Tabela 2 – Tempo e número de passes máximos calculados para cada condição.

Condição	C1: DRY	C2: WET	C3: MQL	C4: DRY	C5: WET	C6: MQL
v_c [m/min]	120 (inserto 1)			80 (inserto 2)		
T_{max} [min]	13,23	13,10	13,18	12,87	13,70	13,57
Nº máx. de passes	10	11	13	10	13	19

Percebe-se que o número máximo de passes varia para cada condição. Esta variação se deve a dois fatores: (i) redução de diâmetro do corpo de prova (d) ao longo do tempo, que diminui o tempo de corte por passe (t_c) (Eq. 1); (ii) variação da velocidade de corte (v_c) (80 e 120 m/min), que também influencia no tempo de corte por passe (t_c).

$$t_c = \frac{\pi \cdot d \cdot L}{1000 \cdot f \cdot v_c} = \frac{\pi \cdot d \cdot 81}{1000 \cdot 0,1 \cdot v_c} = 2,55 \cdot \left(\frac{d}{v_c} \right) \quad [\text{min}] \quad (1)$$

Onde L = comprimento usinado da seção [mm].

Deve-se atentar para o fato de que os valores da Tabela 2 foram calculados considerando o fim de ensaio em todas as condições por tempo de usinagem, resultando em um total de 76 passes. Assim, para cada condição em que se teve um tempo de vida da ferramenta (T) inferior ao tempo máximo de corte especificado (T_{max}), o número de passes para as condições seguintes foi recalculado. O volume total de material removido (V) pode ser calculado pela Equação (2):

$$V = a_p \cdot f \cdot v_c \cdot T = 0,1 \cdot v_c \cdot T \quad [\text{cm}^3] \quad (2)$$

A aquisição das imagens da ferramenta (face, flanco e ponta) foi realizada através do microscópio digital USB Dino-Lite modelo AM-413ZT (Figura 5b), com resolução de 1024 x 728 pixels e ampliação de até 200 vezes. O software dedicado Dino Capture permitiu medir os valores de VB no flanco da ferramenta.

O registro dos valores de rugosidade média (R_a), medidos na superfície dos corpos de prova, foi realizado através do rugosímetro portátil Mitutoyo modelo Surftest SJ-201P. Este equipamento possui resolução de 0,010 μm , agulha do apalpador com raio de ponta de 5 μm , e força de medição de 4 mN. O curso máximo é de 12,5 mm e a velocidade de medição varia de 0,25 a 0,50 mm/s. As medições foram realizadas a cada passe, sem a retirada do corpo de prova do torno. O comprimento de amostragem utilizado foi $l_e = 0,8$ mm e o comprimento de avaliação foi $l_m = 5 \cdot l_e = 4,0$ mm em todas as medições. O software dedicado SJ Tools possibilitou adquirir os valores de R_a e gerar os perfis de rugosidade.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1. Vida da Ferramenta

A Figura 2 ilustra graficamente o comportamento do desgaste na superfície de folga da ferramenta através da largura da marca de desgaste de flanco (VB) em função do tempo de corte, para os diferentes meios lubrificantes, considerando $v_{c1} = 120$ m/min.

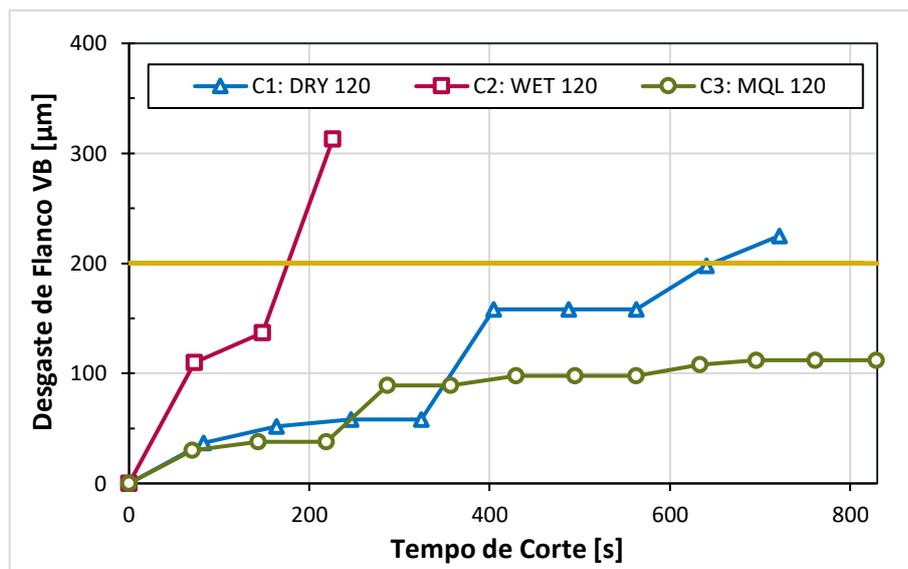


Figura 2 – Desgaste de flanco em função do tempo de corte para diferentes métodos de lubrificação no torneamento com velocidade de corte de 120 m/min

A condição MQL resultou em melhor desempenho da ferramenta, sendo o único método lubrificante para o torneamento do aço super duplex ASTM A182 F55 a $v_{c1} = 120$ m/min que resistiu ao tempo máximo estipulado de 829 s ou 13,82 min com $VB < 200$ μm . A diferença de vida apresentada pode ser explicada pela maior eficiência de penetração das partículas atomizadas de óleo na zona de corte pelo MQL devido à pressurização do fluido, o que acontece em menor magnitude na condição WET (Varadarajan *et al.*, 2002). Dessa forma, a ação do MQL aumentou a lubrificação na zona de corte, reduziu o atrito na interface peça-ferramenta, preservou a camada de revestimento da ferramenta de corte e retardou o surgimento de falhas. Entretanto, este fenômeno não explica o desempenho intermediário do DRY, que ultrapassou o limite de desgaste de flanco definido ($VB \geq 200$ μm) durante o 8º passe dos 9 realizados, com

tempo de corte de 641 s ou 10,68 min, superior ao método WET. O aço super duplex possui alto grau de encruamento, que se acentua com o aumento do gradiente de temperatura. Assim, na condição WET, a ferramenta, que tem baixa tenacidade, tende a falhar com maior facilidade por *attrition* (aderência e arrancamento) principalmente na camada de revestimento. Na condição DRY, o encruamento se dá em menor magnitude, pois a temperatura na zona de corte é maior, o que reduz os esforços de corte e preserva a ferramenta, que possui boa dureza a quente (Subhash *et al.*, 2019). Esta hipótese, observada por Oschelski *et al.* (2020), também explica o melhor desempenho com MQL: a baixa ação refrigerante deste método causa menor encruamento do material. Por outro lado, a boa ação lubrificante favorece a vida da ferramenta, devido à redução de atrito que o DRY não proporciona.

A Figura 3 apresenta as curvas do desgaste de flanco (VB) em função do tempo de corte para $v_{c2} = 80$ m/min em diferentes meios lubrificantes.

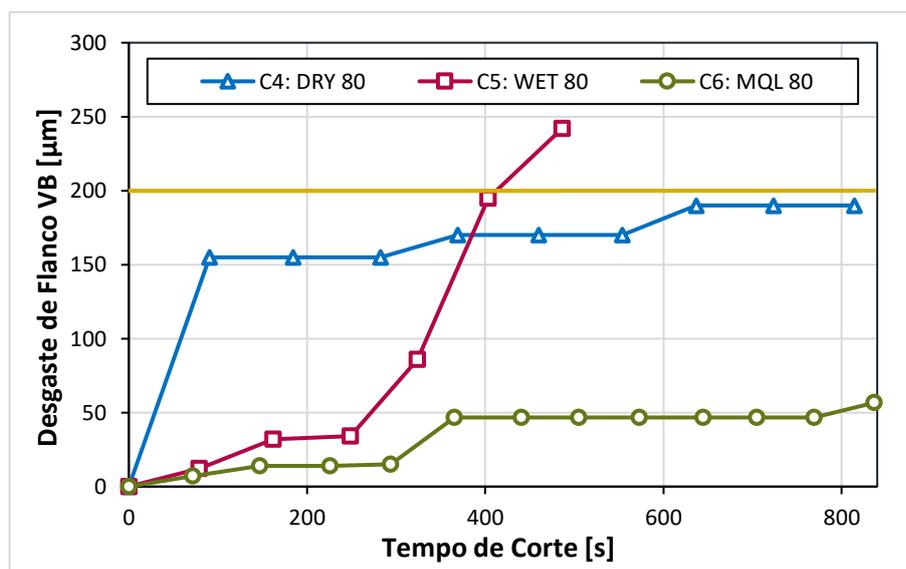


Figura 3 – Desgaste de flanco em função do tempo de corte para diferentes métodos de lubrificação no torneamento com velocidade de corte de 80 m/min

Percebe-se novamente que a condição WET propiciou menor tempo de vida (403 s ou 6,72 min), evidenciando o baixo rendimento deste método no torneamento de semiacabamento do super duplex em estudo. As ferramentas (arestas de corte) utilizadas nas condições DRY e MQL finalizaram os respectivos ensaios de vida antes de atingirem o limite de desgaste de flanco. O melhor resultado foi observado na condição MQL que, ao fim de 837 s (13,95 min), apresentou $VB = 56,7 \mu\text{m}$; em contrapartida, $VB = 190 \mu\text{m}$ foi observado na condição DRY em 814 s (13,57 min). Rajaguru e Arunachalam (2020) também atestaram as vantagens da utilização do MQL para o prolongamento da vida útil da ferramenta de corte no torneamento do aço inoxidável super duplex.

Observando o desempenho dos métodos com a variação da velocidade de corte, percebe-se que para o WET, o aumento na vida da ferramenta com a diminuição da velocidade de corte se deve à melhor penetração do fluido, favorecendo a lubrificação na zona de corte. O que diferencia a condição DRY 120 da DRY 80 é que o calor gerado na segunda foi menor e por esse motivo, a vida aumentou. A condição DRY gerou os melhores resultados de vida de ferramenta que a condição WET independentemente da velocidade de corte, evidenciando uma alternativa economicamente e ambientalmente vantajosa.

Durante o ensaio de vida C4 (DRY 80), logo no 1º passe, houve arrancamento de material, gerando $VB = 155 \mu\text{m}$, fenômeno que não se repetiu nos passes seguintes, com pequenos

incrementos na largura do desgaste de flanco até o final do tempo estipulado para o ensaio. Este comportamento não foi observado nos demais ensaios. De acordo com Astakhov *et al.* (2011), uma lubrificação adequada garante que a curva de desgaste não expresse aumento rápido de VB no início dos ensaios. A redução do atrito gerado na interface ferramenta-peça, causada pelo efeito lubrificante do fluido de corte, evita a degradação prematura da camada de revestimento da ferramenta. Para a condição MQL, a ferramenta apresentou desgaste gradual e uniforme ao longo do ensaio de vida. Entretanto, no ensaio C5 (WET 80), o arrancamento de material da ferramenta de corte por *attrition* foi acompanhado por falhas sucessivas que acarretaram o fim de vida prematuro da mesma.

A Figura 4 apresenta uma comparação do volume total de material removido calculado a partir da Eq. 2 (V) e o tempo de vida (T) entre as condições lubrificantes para as duas velocidades de corte. Observa-se para a velocidade de corte mais elevada que as diferenças de desempenho entre os meios lubrificantes foram mais expressivas.

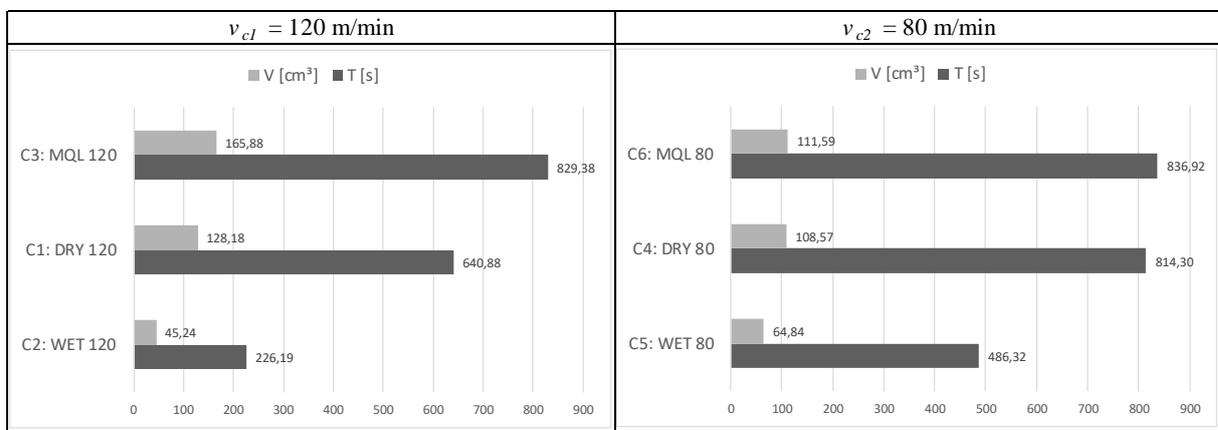


Figura 4 – Volume de material removido [cm³] em cada tempo de vida [s] para as diferentes condições de lubrificação.

As variações percentuais do tempo de vida entre MQL e WET (melhor e pior resultado) para velocidade de 80 e 120 m/min foram, respectivamente, 72,1% e 267,7%. Esta diferença pode ser explicada pelo aumento da temperatura na zona de corte, que acompanha o aumento da velocidade de corte. Dessa forma, os fenômenos físico-químicos e os mecanismos de desgaste termicamente ativados, como difusão e oxidação (Cantero *et al.*, 2013), fizeram-se mais evidentes para a maior v_c . Nota-se ainda para a condição DRY que o aumento de 50% na velocidade de corte reduziu o tempo de vida 21,3%, mas o volume de material removido aumentou 18,1%. Para a condição WET, ambos diminuíram com o aumento de v_c (53,5% em T e 30,2% em V), enquanto na condição MQL, o volume de material removido aumentou 48,7% com o incremento da velocidade de corte. Ao realizar uma análise simples de desempenho do processo, com uma v_c mais alta tem-se a remoção de maior volume de material em menor tempo, o que é um dado útil para a linha de produção industrial. A utilização de $v_c = 120$ m/min se traduz, na prática, em mais peças produzidas antes do fim da vida de cada ferramenta, e em um tempo mais curto, aumentando a produtividade. Em outras palavras, tem-se economia no tempo gasto com o corte, além de maior aproveitamento da ferramenta, reduzindo o custo do processo para estes dois aspectos.

3.2. Desgastes da Ferramenta

As figuras 5 e 6 mostram as imagens das superfícies de folga (flanco), de saída (face) e das pontas dos insertos, coletadas através da microscopia óptica digital ao final de cada ensaio

de vida, ou seja, a situação final da ferramenta de corte em cada uma das condições lubrificantes de acordo com os parâmetros $VB \geq 200 \mu\text{m}$ ou $T > T_{\text{max}}$.

Avaliando as imagens da Figura 5, percebem-se marcas verticais de abrasão mecânica na região desgastada, principalmente na condição DRY, para ambas as velocidades de corte. Com o efeito lubrificante do WET e, principalmente do MQL, essas marcas ficaram menos evidentes devido à redução do atrito. Há desgaste predominante de flanco em todas as condições, entretanto, para as condições WET e MQL, é observada a formação de entalhe, possivelmente devido ao atrito entre o cavaco lamelar e a ferramenta de corte, e a presença do mecanismo de oxidação (Diniz *et al.*, 2013). Nota-se também quantidade significativa de material aderido, principalmente nas marcas de desgaste, além de aresta postiça de corte (APC) na condição DRY. Possivelmente a presença de material aderido encobriu o entalhe nesta condição.

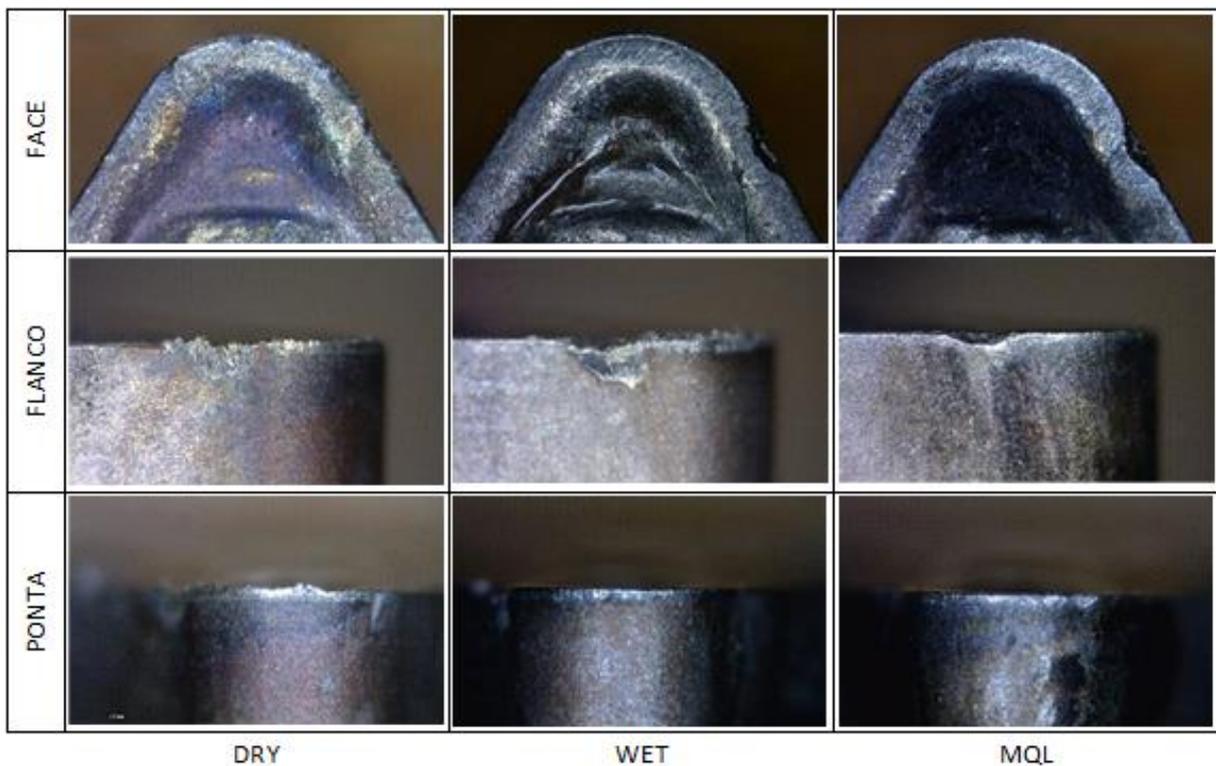


Figura 5 – Imagens dos insertos ao final dos ensaios, nas três condições lubrificantes, para $v_c = 120 \text{ m/min}$.

A análise das imagens da Figura 6 permite identificar que para a velocidade de corte mais baixa houve maior formação de APC, observada nas três condições lubrificantes, como é esperado em materiais dúcteis com baixas velocidades de corte (Diniz *et al.*, 2013). Possivelmente houve geração de entalhe nas três condições, entretanto em MQL e DRY, o material aderido encobriu o desgaste. Nota-se ainda aparente trinca na ponta da ferramenta e maior quantidade de material aderido na condição DRY. A elevada tendência à adesão de material na ferramenta de corte é uma característica intrínseca no corte de aços inoxidáveis super duplex, muito por conta da ductilidade do material. Entretanto, a quantidade de material aderido depende fortemente das circunstâncias do processo, como a velocidade de corte e condição lubrificante, e causam grande influência nos parâmetros de saída estudados. Notou-se, através das imagens de microscopia, que durante os ensaios realizados com fluido em abundância, o material aderido era removido a cada passe, causando remoção de material da ferramenta por *attrition* (Machado *et al.*, 2015), representado pelos significativos incrementos na largura de VB ao longo do tempo de usinagem (Fig. 2). Com as condições MQL

e DRY, o material aderido se mantinha sobre a marca de desgaste por mais tempo, atuando como proteção à superfície da ferramenta, e dessa forma, não foram observados elevados incrementos no valor de VB. Tal distinção pode ser explicada pela temperatura na zona de corte. Na condição WET, a maior remoção de calor provoca redução notável da temperatura na zona de corte, como foi observado por Subhash *et al.* (2019), o que aumenta o encruamento do material aderido, resultando em um material mais duro e conseqüentemente frágil, mais propício à quebra e a ser arrancado, juntamente com parte da ferramenta de corte. Para os demais métodos lubrificadorantes, a temperatura maior permitiu alguma maleabilidade ao material, diminuindo as ocorrências de arrancamento e garantindo maior tempo de vida à ferramenta. A condição DRY com $v_c = 80$ m/min melhor ilustra o fenômeno: houve desgaste acelerado logo no primeiro passe, todavia a ferramenta resistiu até o final do ensaio sem mais ocorrências deste tipo, devido ao material aderido não ter sido arrancado da cavidade gerada pelo lascamento. Houve desgaste de cratera e marca de oxidação nas condições DRY (maior) e MQL (menor), e aparente lascamento após o entalhe na condição WET. Entretanto, a variação da velocidade de corte não gerou diferenças expressivas nos padrões de desgaste. O tipo predominante foi o de flanco e a região onde ocorreu maior desgaste (entalhe) coincide com o valor da profundidade de corte ($a_p = 1,0$ mm), o que já era esperado, uma vez que a largura do cavaco é praticamente igual a a_p devido ao ângulo de posição da ferramenta. ($\chi_r = 93^\circ$).

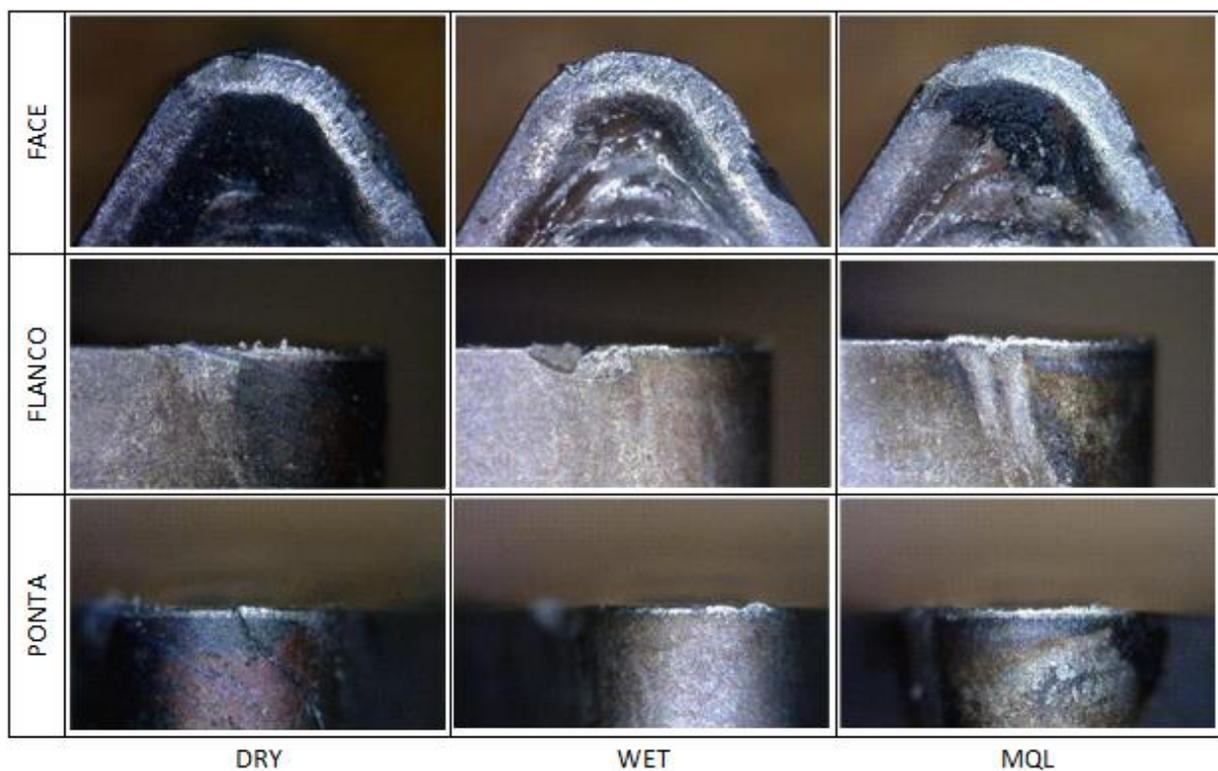


Figura 6 – Imagens dos inserts ao final dos ensaios, nas três condições lubrificadorantes, para $v_c = 80$ m/min.

3.3. Rugosidade das Superfícies Usinadas

Os gráficos da Figura 7 representam a variação da rugosidade média R_a [μm] gerada na superfície semiacabada do aço super duplex ASTM A182 F55 ao longo dos ensaios de vida e a porcentagem de pontos coletados em cada classe de rugosidade, de acordo com a norma ABNT NBR 8404 (1984). Nota-se, de maneira ampla, que os melhores resultados foram observados

para as condições com aplicação de MQL, com 83% dos pontos avaliados na classe N6 de rugosidade (0,4 a 0,8 μm) e nenhum ponto na classe N8 (1,6 a 3,2 μm). Além disso, observa-se que a classe N7 (0,8 a 1,6 μm) foi predominante na condição WET, com 67% dos pontos mensurados. Maruda. *et al.* (2015) também comprovaram os efeitos positivos no acabamento superficial dos aços inoxidáveis super duplex torneados com o uso de MQL.

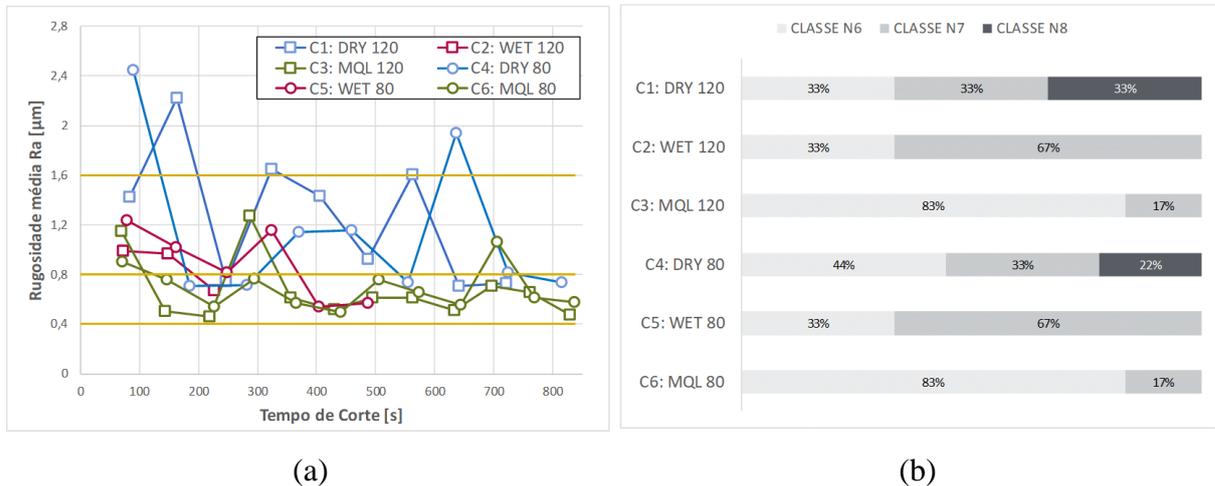


Figura 7 – Rugosidade média: (a) variação de Ra ao longo do tempo de corte; (b) percentagem de pontos em cada classe de rugosidade, para cada condição de corte.

A condição DRY teve o pior desempenho, sendo a única que apresentou pontos na classe N8. A redução do atrito na interface ferramenta-peça, causada pelo efeito lubrificante do fluido de corte, facilita a penetração da ferramenta na peça com menores esforços, promovendo uma melhor qualidade da superfície usinada. A redução do atrito ainda reduz a formação de aresta postíca de corte, que prejudica o acabamento, pois periodicamente rompe e se refaz, gerando irregularidades na superfície (Stephenson e Agapiou, 2016). Outra hipótese que justifica este desempenho é que a maior temperatura na zona de corte resultante do DRY gerou maiores taxas de deformação plástica na superfície da peça, próximo à formação do cavaco. Com a utilização de fluido de corte, há maior remoção de calor e, conseqüentemente, temperaturas mais baixas, gerando menos defeitos (Oliveira Jr. *et al.*, 2014). Por fim, a diferença de velocidade não alterou a distribuição percentual dos pontos nas classes de rugosidade para as condições WET e MQL.

A Figura 8 mostra a diferença entre as rugosidades médias geradas pela ferramenta de corte nova ($VB < 100 \mu\text{m}$) e desgastada ($VB > 100 \mu\text{m}$) em cada um dos meios lubrificantes. Uma média entre os valores de Ra foi calculada, sem distinção entre velocidades de corte. O resultado indica menores valores de Ra ao passo que a ferramenta é desgastada. Como foi observado por Polly *et al.* (2020) e Shahabi e Ratnam (2009), isso pode ter relação com o achatamento da ponta da ferramenta à medida que ocorrem os desgastes, aumentando o raio de ponta efetivo e reduzindo os picos de rugosidade. A comparação entre os perfis de rugosidade para ferramenta nova e desgastada para condição DRY com $v_c = 120 \text{ m/min}$ é apresentada na Figura 9, e corrobora esta hipótese. Foi escolhido o ensaio C1: DRY 120 para ser apresentado, uma vez que para esta condição, houve grande discrepância entre os perfis de rugosidade e os valores de Ra no início e no fim do ensaio. Para o passe 2 (ferramenta nova), o perfil gerado é aleatório e irregular, ao contrário do que acontece com o perfil resultante do passe 9 (ferramenta desgastada), em que há um certo padrão (marcas de avanço), mas fora de conformidade. Esses gráficos permitem a avaliação do comportamento da rugosidade, para além dos resultados já analisados dos valores de Ra e confirmam, através dos picos e vales expressivos nos passes iniciais, o baixo desempenho observado. Ademais, a

redução da quantidade de picos e vales, com o desgaste da ferramenta, confirma a hipótese já discutida de achatamento do raio de ponta da ferramenta de corte.

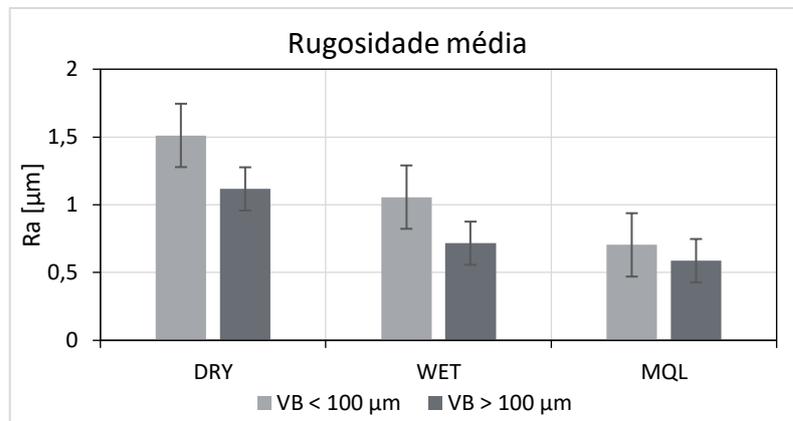


Figura 8 – Média dos valores de Ra para a ferramenta nas condições nova e desgastada em cada um dos meios lubrificantes.

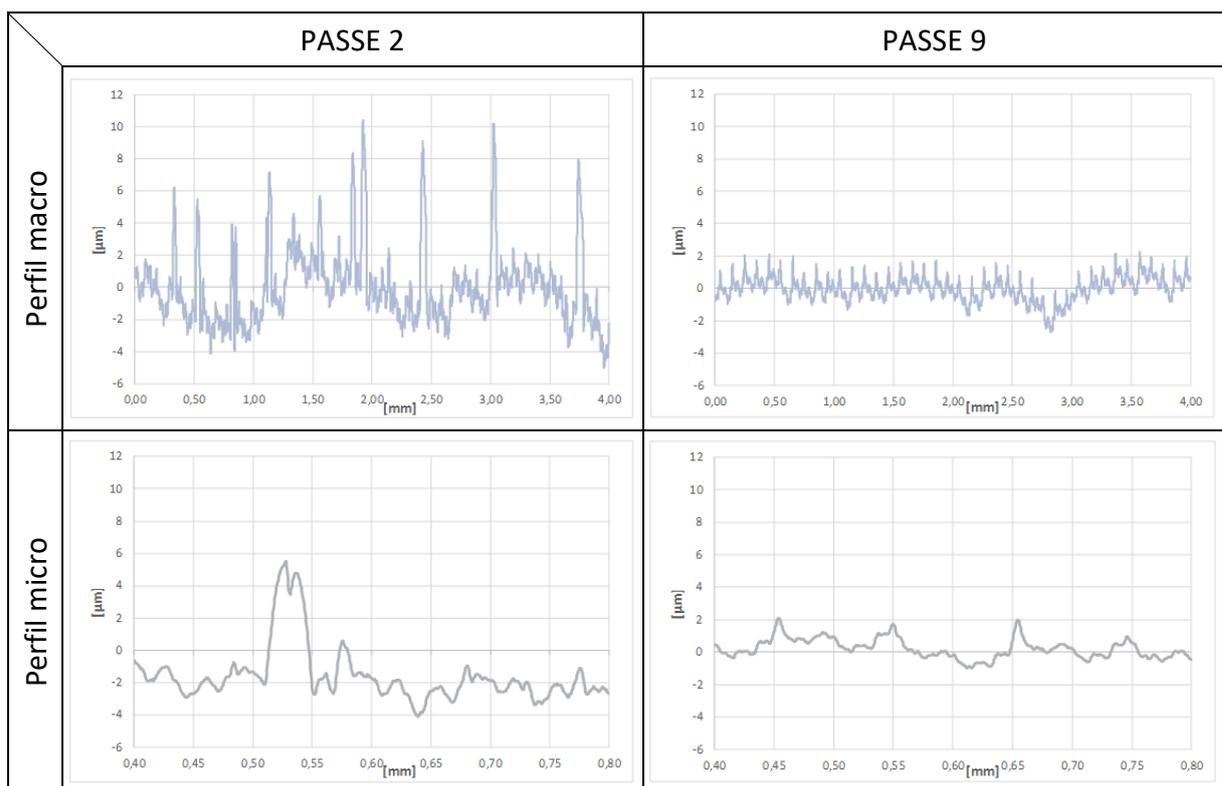


Figura 9 – Perfis macro e micro de rugosidade para a condição DRY com $v_c = 120$ m/min, considerando a ferramenta nova e desgastada.

4. CONCLUSÃO

O estudo da influência dos meios lubrificantes (DRY, WET e MQL) e das velocidades de corte ($v_{c1} = 120$ m/min e $v_{c2} = 80$ m/min) na vida da ferramenta de metal-duro com revestimento PVD-TiAlSiN durante o torneamento de semiacabamento do aço inoxidável super duplex ASTM A182 F55 resultou nas seguintes conclusões:

- Notou-se maior tempo de vida da ferramenta de corte, para todas as condições lubrificantes, com $v_{c2} = 80$ m/min. Entretanto, esse prolongamento da vida não foi suficiente para que houvesse aumento do volume de material removido nas condições DRY e MQL. Portanto, pode-se afirmar que, para estas condições, $v_{c1} = 120$ m/min resultou em maior produtividade.
- A condição DRY teve desempenho intermediário na vida da ferramenta para v_{c1} e v_{c2} , o que é positivo sob o ponto de vista ambiental. Todavia, apresentou maior desgaste de flanco (VB) no início do ensaio, em comparação com as demais condições, para $v_{c2} = 80$ m/min.
- O método MQL teve desempenho de vida de ferramenta e rugosidade da superfície usinada superior às outras condições lubrificantes, independentemente da velocidade de corte empregada. Assim, para as condições de corte estudadas, pode-se dizer que o método MQL garante vantagens do ponto de vista ambiental e de produtividade.
- Os valores de rugosidade mais elevados foram observados para o método DRY, o que pode ser explicado pela falta de lubrificação.
- A utilização de $v_{c1} = 120$ m/min piorou o acabamento superficial na condição DRY. Para as demais condições, a influência da velocidade de corte foi pouco expressiva.
- Para as duas velocidades de corte, a condição WET apresentou acabamento intermediário. Entretanto, apresentou menor vida da ferramenta de corte, atingindo o critério estabelecido ($VB \geq 200 \mu\text{m}$) prematuramente, devido ao maior encruamento do material nesta condição.
- O desgaste aumentou o raio de ponta da ferramenta de corte e isso reduziu os valores médios de rugosidade, bem como os picos e vales do perfil de rugosidade, para todos os meios lubrificantes.

4.1. Sugestões para Trabalhos Futuros

- Utilização de outras técnicas não convencionais de lubrificação, como quantidade mínima de lubrificação refrigerada (MQCL) e MQL com adição de nanopartículas.
- Manutenção do MQL como método lubrificante (condição mais vantajosa observada neste trabalho) e variação do avanço e profundidade de corte, para determinação dos parâmetros ótimos de torneamento de semiacabamento do super duplex.
- Repetição dos ensaios para torneamento de acabamento, modificando a geometria da ferramenta de corte e mantendo os parâmetros de saída.

REFERÊNCIAS

ABNT NBR 8404. “Indicação do estado de superfícies em desenhos técnicos – Procedimento”. **Associação Brasileira de Normas Técnicas**, 1984.

AHMED, Y. S.; PAIVA, J. M.; COVELLI, D.; VELDHUIS, S. C. “Investigation of coated cutting tool performance during machining of super duplex stainless steels through 3D wear evaluations”. **Coatings**, v. 7, n. 8, p. 127, 2017.

ALVES, S. M.; OLIVEIRA, J. F. G. “Adequação ambiental dos processos usinagem utilizando produção mais limpa como estratégia de gestão ambiental”. **Production**, v. 17, p. 129-138, 2007.

ASTAKHOV, V. P.; DAVIM, J. P. “Tools (geometry and material) and tool wear”. In: **Machining: Fundamentals and Recent Advances**, Springer-Verlag, London, p. 29-57, 2008.

ASTAKHOV, V. P. “Machining of hard materials—definitions and industrial applications”. In: **Machining of Hard Materials**, Springer-Verlag, London, p. 1-32, 2011.

BISAGLIA, F.; TONIOLO, M.; BASONI, J.; CALLIARI, I.; RAMOUS, E. “Problematiche di produzione di stampati e forgiati in acciaio inossidabile ASTM A182 F55”. **La Metallurgia Italiana**, v. 5, p. 11-15, 2013.

BONDMANN. **Sobre o Way45 – V Fluido para Metalworking Nanotecnológico**. Disponível em <<https://bondmann.com.br/produtos/way45-v>>. Acesso em 05/01/2023.

CANTERO, J. L.; DÍAZ-ÁLVAREZ, J.; MIGUÉLEZ, M. H.; MARÍN, N. C. “Analysis of tool wear patterns in finishing turning of Inconel 718”. **Wear**, v. 297, p. 885-894, 2013.

DINIZ, A. E.; MARCONDES, F. C.; COPPINI, N. L. **Tecnologia da Usinagem dos Materiais**, 8 ed., Artliber, São Paulo, 2013.

DIXIT, U. S.; SARMA, D. K.; DAVIM, J. P. **Environmentally Friendly Machining**. Springer, New York, 2012.

GAMARRA J. R.; DINIZ, A. E. “Taper turning of super duplex stainless steel: tool life, tool wear and workpiece surface roughness”. **Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering**, v. 40, p. 39, 2018.

KANG, M. C.; KIM, K. H.; SHIN, S. H.; JANG, S. H.; PARK, J. H.; KIM, C. “Effect of the minimum quantity lubrication in high-speed end-milling of AISI D2 cold-worked die steel (62 HRC) by coated carbide tools”. **Surface and Coatings Technology**, v. 202, p. 5621-5624, 2008.

MACHADO, A. R.; ABRÃO, A. M.; COELHO, R. T., SILVA, M. B. **Teoria da Usinagem dos Materiais**. 3 ed., Blucher, São Paulo, 2015.

MARUDA, R. W.; LEGUTKO, S.; KROLCZYK, G. M., RAOS, P. “Influence of cooling conditions on the machining process under MQCL and MQL conditions”. **Tehnički Vjesnik**, v. 22, n. 4, p. 965-970, 2015.

MASOUDI, S.; VAFADAR, A.; HADAD, M.; JAFARIAN, F. “Experimental investigation into the effects of nozzle position, workpiece hardness, and tool type in MQL turning of AISI 1045 steel”. **Materials and Manufacturing Processes**, v. 33, n. 9, p. 1011-1019, 2018.

MIA, M.; GUPTA, M. K.; SINGH, G.; KRÓLCZYK, G.; PIMENOV, D. Y. “An approach to cleaner production for machining hardened steel using different cooling-lubrication conditions”. **Journal of Cleaner Production**, v. 187, p. 1069-1081, 2018.

OLIVEIRA JR., C. A.; DINIZ, A. E.; BERTAZZOLI, R. “Correlating tool wear, surface roughness and corrosion resistance in the turning process of super duplex stainless steel”. **Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering**, v. 36, p. 775-785, 2014.

OSCHELSKI, Tiago Borba. Aplicação de métodos alternativos de lubrificarrefrigeração no torneamento da liga de níquel Hastelloy C-276. 2020.

PARO, J., HÄNNIKEN, H. e KAUPINEN, V. “Tool wear and machinability of HIPed P/M and conventional cast duplex stainless steels”, **Wear**, v. 249, n 3-4, p. 279-284, 2001.

PARSI, P. K.; KOTHA, R. S.; ROUTHU, T.; PANDEY, S.; DWIVEDY, M. “Machinability evaluation of coated carbide inserts in turning of super-duplex stainless steel”. **SN Applied Sciences**, v. 2, p. 1933, 2020.

PETROPOULOS, G. P.; PANDAZARAS, C. N.; DAVIM, J. P. “Surface texture characterization and evaluation related to machining”. In: **Surface Integrity in Machining**, Springer, London, p. 37-66, 2010.

POLLY, M. S.; MAYRHOFER, A.; SOUZA, A. J. “Performance of ISO P and ISO S carbide tools in hard turning of AISI 4140 under dry and MQL conditions”. **Ingeniare: Revista Chilena de Ingeniería**, v. 28, n. 1, p. 95-105, 2020.

RAJAGURU, J.; ARUNACHALAM, N. “A comprehensive investigation on the effect of flood and MQL coolant on the machinability and stress corrosion cracking of super duplex stainless steel”. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 276, p. 116417, 2020.

SHAHABI, H. H.; RATNAM, M. M. “In-cycle monitoring of tool nose wear and surface roughness of turned parts using machine vision”. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 40, p. 1148-1157, 2009.

STEPHENSON, D. A.; AGAPIOU, J. S. **Metal Cutting Theory and Practice**. CRC Press, Boca Raton, 2016.

SUBHASH, N.; SAMBEDANA, S.; RAJ, P. N.; JAGADEESHA, T. “Experimental study on tool wear and optimization of process parameters using ANN-GA in turning of super-duplex stainless steel under dry and wet conditions”. In: **Advances in Manufacturing Technology**. Lecture Notes in Mechanical Engineering. Springer, Singapore, p. 411-420, 2019.

SUMITOMO, **AC6000M series - Coated grades for stainless steel**. Disponível em <<https://www.sumitool.com/en/products/cutting-tools/inserts/grades/ac6000m.html>>. Acesso em 05/01/2023.

TELES, D. B.; MARIANO, J. F.; SOUZA, A. J. “Metallic materials for valves applied in oil & gas industry”. **Proceedings of the Rio Oil & Gas Expo and Conference**, Rio de Janeiro, RJ, Brazil, 2022.

VARADARAJAN, A. S.; PHILIP, P. K.; RAMAMOORTHY, B. “Investigations on hard turning with minimal cutting fluid application (HTMF) and its comparison with dry and wet turning”. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 42, n. 2, p. 193-200, 2002.